

SUPRALEITUNG

Die vergessene Entdeckung

Bereits vor 75 Jahren entdeckte Lew Wassiljewitsch Schubnikow die Typ-II-Supraleitung.

Anatoly Shepelev und David Larbalestier

Die Geschichte der Typ-II-Supraleitung und ihres Entdeckers Lew Wassiljewitsch Schubnikow ist eine tragische Episode der Physik. Sie gewährt nicht nur Einblicke in die Geschichte der Supraleitung, sondern auch in die politische und wissenschaftliche Kultur der Sowjetunion in den späten 1930er-Jahren.

Bereits rasch nach ihrer Entdeckung beschäftigten sich einige der besten Köpfe unter den Physikern mit der Supraleitung. Dennoch entwickelte sich ein echtes Verständnis nur äußerst langsam. Versuche, die von Kamerlingh Onnes entdeckten Elementsupraleiter zu legieren, begannen in den späten 1920er-Jahren unter seinem Nachfolger Wander Johannes de Haas. Bekannt war, dass reine Metalle ihre Supraleitfähigkeit bei einem wohldefinierten, kritischen Feld H_c verlieren, wobei sich dieser Übergang sowohl in der Wiederherstellung des Widerstandes als auch in dem Verlust des perfekten Diamagnetismus äußert. Doch die Experimente von de Haas und anderen zeigten, dass supraleitende Legierungen ein „unordentliches“ Verhalten an den Tag legen: So verschwindet der Diamagnetismus bereits bei deutlich schwächeren Feldern, als sie zur Wiederherstellung der normalen Leitfähigkeit erforderlich sind. Da die meisten Legierungen damals weder homogen noch thermisch behandelt waren, führte man die Ausdehnung des widerstandslosen supraleitenden Zustandes hin zu Feldern von ein paar hundert Millitesla (mT), also zwei bis drei Mal so hoch wie H_c in reinen Metallen, meist auf kleine filamentartige Inhomogenitäten zurück, mit Ausdehnungen deutlich unter der Eindringtiefe im Supraleiter λ . Aus diesen Vorstellungen entstand schrittweise die „Mendelsohn-Schwamm“-Hypothese, welche davon ausging, dass aufgrund inhomogener Zusammensetzung, Struktur oder innerer Spannungen dünne vielfach verbundene Strompfade entstanden, welche die Supraleitung bei Feldern oberhalb H_c aufrecht erhielten [1]. Diese Hypothese erhielt durch die 1935 entwickelten Modelle von Gorter [2] und London [3] weitere Unterstützung und blieb für 25 Jahre unangefochten, bevor in den 1960er-Jahren gezeigt wurde, dass sie falsch ist.

Der ukrainische Physiker Lew Wassiljewitsch Schubnikow zählt zu den Pionieren der Tieftemperaturphysik. Geboren wurde er 1901 in St. Petersburg, wo sein Vater als Buchhalter arbeitete. Nach seinem Gymnasialabschluss besuchte er die Universität seiner nun



Lew Wassiljewitsch Schubnikow (2. Reihe, 4. von links) im Jahr 1933 mit seinen Kollegen des Tieftemperaturlabors in Charkiw, links von ihm ist sein erster Doktorand und späterer Mitarbeiter G. D. Shepelev zu sehen.

Leningrad genannten Heimatstadt. Man schrieb das erste Jahr des russischen Bürgerkriegs, und Schubnikow war der einzige Student seines Jahrgangs, der die physikalische Fakultät besuchte. Mit seinem Segelboot geriet er 1921 ungewollt in den Finnischen Meerbusen. Von Finnland aus schickte man ihn nach Deutschland, von wo er erst 1922 wieder in die Sowjetunion zurückkehren konnte. Er setzte sein Studium am Leningrader Polytechnischen Institut fort und machte dort 1926 seinen Abschluss.

Auf Empfehlung von Abram Ioffe gelangte er noch im selben Jahr an das Labor von Kamerlingh Onnes

KOMPAKT

- Die für die Entwicklung von supraleitenden Magneten entscheidende sog. Typ-II-Supraleitung wurde vom ukrainischen Physiker Lew Wassiljewitsch Schubnikow und seinen Mitarbeitern bereits in den 1930er-Jahren entdeckt und publiziert.
- Schubnikow wurde wie andere seiner Kollegen Opfer des „Großen Terrors“ (1936 – 1938) der Stalin-Ära, und seine Forschungsergebnisse gerieten in Vergessenheit.
- Erst 1963 erhielten diese Arbeiten die verdiente Anerkennung bei der „International Conference on the Science of Superconductivity“ in den USA.

Prof. Anatoly Shepelev, National Science Center, Kharkov Institute of Physics & Technology, Ukraine; **Prof. David Larbalestier**, Applied Superconductivity Center, National High Magnetic Field Laboratory, Florida State University, Tallahassee, USA

in Leiden, wo er mit eigenen Forschungsarbeiten in der Tieftemperaturphysik begann. 1930 kehrte er in die Sowjetunion zurück und arbeitete am Ukrainischen Physikalisch-Technischen Institut (UPhTI) in Charkiw. Dort hatte sich eine Gemeinschaft enthusiastischer Forscher zusammengefunden, die darauf brannten, topaktuelle wissenschaftliche Forschung zu betreiben. Dem Talent Schubnikows als Wissenschaftler von Weltniveau ist die Gründung des ersten sowjetischen Tieftemperatur-Labors in Charkiw zu verdanken. Nach Leiden, Toronto und Oxford war es weltweit das vierte Labor, an dem die Verflüssigung von Helium gelang.

Trotz der enormen wirtschaftlichen Schwierigkeiten, mit denen sich die UdSSR konfrontiert sah, hatte die Regierung das UPhTI nach europäischem Vorbild gegründet und sehr gut ausgestattet. Das Ziel bestand darin, die aktuellsten Gebiete der Physik zu erforschen (Theoretische Physik, Tieftemperaturphysik, Kernphysik, etc.). So herausragende Persönlichkeiten wie Ioffe, Ehrenfest, Fock, Landau und Kapitza halfen beim Aufbau.

Eines von Schubnikows frühen Projekten bestand darin, äußerst homogene Einkristalle aus Pb-Legierungen zu züchten, anstatt mit den inhomogenen Legierungen zu arbeiten, die in anderen Labors im Gebrauch waren. Gemeinsam mit seinen Mitarbeitern W. I. Chotkewitsch, G. D. Shepelev und J. N. Rjabinin untersuchte er die magnetischen Eigenschaften von Einkristallen aus Pb-Tl und Pb-In, welche sehr vorsichtig bis nahe an ihren Schmelzpunkt erhitzt wurden, um jegliche filamentartigen Schwamm-Effekte völlig auszuschließen. Ihre wichtigste Veröffentlichung von 1936 zeigt eindeutig, dass die Beimengung von einigen wenigen Prozent Thallium oder Indium zum Supra-



Lew Schubnikow, ca. 1935

leiter Blei einen neuen Typus der Supraleitung hervorruft [4]. Die wichtigsten Ergebnisse waren:

- Unterhalb einer kritischen Konzentration der Beimengung verhalten sich die Legierungen in einem Magnetfeld genau wie reine Supraleiter; sie zeigen den vollständigen Meißner-Effekt und perfekten Diamagnetismus bis zu einem Feld H_c (Abb. 1a).
- Eine höhere Beimengung jenseits der kritischen Konzentration verändert die magnetischen Eigenschaften drastisch. Der perfekte Diamagnetismus des Meißner-Zustands tritt nur bis zu H_{c1} auf. Ab diesem Feld beginnt der Magnetfluss in die Legierung einzudringen, wobei sie bis zu einem erheblich höheren Feld H_{c2} supraleitend bleibt; dort verschwindet dann auch der Diamagnetismus des supraleitenden Zustandes völlig (Abb. 1b). Nach dem späteren Verständnis von Ginzburg und Landau kommt es zu diesem Übergang, wenn das Verhältnis zwischen Eindringtiefe λ im Supraleiter und Kohärenzlängen ξ , dem sog. Ginzburg-Landau-Parameter κ , den Wert $1/\sqrt{2}$ übersteigt [5].

Die Analyse verschiedener Legierungen zeigt, dass eine höhere Beimengung (bzw. κ) die Lücke zwischen H_{c1} und H_{c2} vergrößert, sodass H_{c1} kleiner und – das war der entscheidende Durchbruch – H_{c2} größer wird.

Leider ereignete sich diese Entdeckung zu einer Zeit heftigsten politischen Aufruhrs in der Sowjetunion. Der „Große Terror“, der im ganzen Land herrschte, bereitete der Atmosphäre von Kreativität und Freiheit unter den Physikern des Instituts ein Ende. Viele bedeutende Wissenschaftler wurden verhaftet; die ausländischen Physiker mussten das Land verlassen. Landau saß ein Jahr lang im Gefängnis und kam erst nach Intervention von Kapitza frei.

Wegen Schubnikows Zeit in Leiden sowie der zahlreichen westlichen Besucher in Charkiw wurde er bei einer von Stalins Säuberungsaktionen beschuldigt, ein Spion zu sein, Ende 1937 verhaftet und kurz darauf hingerichtet. Die Nachrichten waren so streng kontrolliert, dass seine Kollegen in Charkiw noch während des ganzen Zweiten Weltkrieges dachten, er sei noch am Leben. Erst 1957 wurde seine Exekution öffentlich bestätigt.

G. D. Shepelev, der sich Anfang 1932 an der UPhTI einschrieb und Schubnikows erster Doktorand wurde, leitete das Kryolabor von September 1937 bis Oktober 1938 und wurde dann durch Erlass des „Volkskommissariats für die Schwerindustrie“ zum Leiter einer Versuchsanlage für Tieftemperatur gemacht, verbunden mit der Position des stellvertretenden Direktors des UPhTI. Zwei Tage nach dem deutschen Überfall auf die Sowjetunion meldete er sich freiwillig an die Front zur Flugabwehr und fiel im Frühjahr 1942 bei der Verteidigung von Sevastopol, im Alter von nur 36 Jahren.

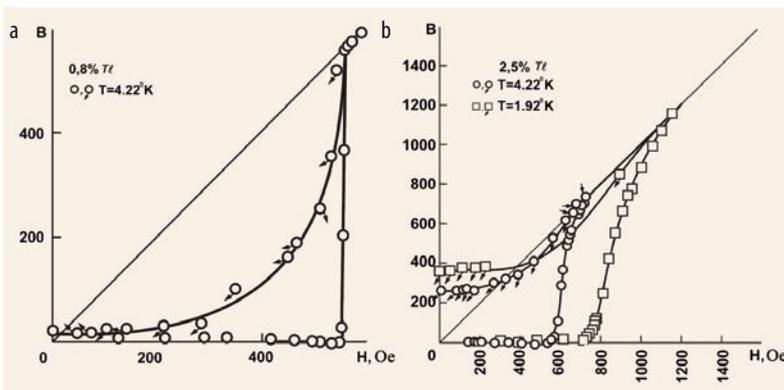


Abb. 1 Schubnikow und seine Mitarbeiter untersuchten, wie sich die magnetische Induktion B der zylinderförmigen Einkristalle bestimmter Legierungen in Abhängigkeit vom angelegten Feld H verhielt, hier für den Typ-I-Supraleiter Pb+0,8Gew.-%Tl (a) bzw. den Typ-II-Supraleiter Pb+2,5Gew.-%Tl (b) gezeigt. Beide Einkristalle zeigen eine kleine

Hysterese. Der Typ-I-Supraleiter ist perfekt diamagnetisch bis zu einem Feld H_c , bei dem die Supraleitfähigkeit verloren geht. Beim Typ II dringt der Fluss bereits bei einem kleineren Feld H_{c1} in den Supraleiter ein, die Supraleitung bricht aber erst bei einem höheren Feld H_{c2} zusammen, ab dem die normale Zustandskurve $B = H$ gilt.

Der Weg zur Wiederentdeckung

Mit diesen tragischen Ereignissen ging auch ein ungeheurer wissenschaftlicher Rückschlag einher. Zwar hatte de Haas gezeigt, dass Supraleitung in eutektischen Pb-Bi-Legierungen bis zu einem H_{c2} von 2 T existieren konnte [6]. Doch weder in Leiden noch in einem der anderen Labors, die mit supraleitenden Legierungen arbeiteten, würdigte irgendjemand den thermodynamischen Zustand, den Schubnikow und seine Mitarbeiter in den bemerkenswerten Einkristallen entdeckt hatten. Alle waren „gefangen“ von dem Modell des inhomogenen „Mendelssohn-Schwamms“, wonach der filamentartige Anteil des Hochfeld-Supraleiters zu gering sei, um eine nutzbare Stromdichte aufrecht zu erhalten. Selbst Landau erkannte die Möglichkeiten der Typ-II-Supraleitung nicht, als er und Ginzburg 1950 ihre phänomenologische Theorie der Supraleitung schufen, die, wie sich später herausstellte, Typ-II-Supraleiter auf das Treffendste beschreibt [5]. Obwohl M. Ruhemann beim 6. Internationalen Tieftemperatur-Kongress in Den Haag (1936) die Resultate von Schubnikow und seinen Mitarbeitern vorstellte und die Sondernummer Phys. Z. Sowjet. vor Ort an die Kongressteilnehmer verteilt wurde [4], bestätigte keiner der Wissenschaftler, die damals an Supraleitung arbeiteten, die Forschungsarbeiten aus Charkiw oder führte sie fort – auch wenn sich Bezüge auf Schubnikows Arbeiten in einer Reihe von Veröffentlichungen der damaligen Fachleute finden lassen [7].

Es ist bemerkenswert, dass die Ergebnisse Schubnikows auch dann noch in Vergessenheit blieben, als nach dem Zweiten Weltkrieg die Forschung wieder anlief. Obwohl sich Abrikosov in seinem berühmten Artikel von 1957 zum Vortex-Zustand in Supraleitern mit sehr hohem κ darauf berief, erhielten weder das Experiment noch der Vortex-Zustand Anerkennung [8]. Dies änderte sich erst, als Ende 1960 Kunzler, Hsu, Buehler und Wernick einige Proben des bei 18 Kelvin supraleitenden Materials Nb_3Sn in den 8,8 Tesla-Magneten der Bell Labs platzierten und dabei feststellten, dass einer ihrer Prototyp-Drähte bei diesem Feld eine Stromdichte von mehr als 1000 A/mm² trug [9]. Binnen eines Jahres wurden supraleitende Magnete präsentiert, die Felder von fünf Tesla und mehr erzeugen konnten [10]. Die triumphale Anerkennung der Entdeckung von Schubnikow, Shepelev und ihren Kollegen kam schließlich auf der „International Conference on the Science of Superconductivity“ (USA 1963), bei der der Vorsitzende und der Sekretär der Tagung, J. Bardeen und R. V. Schmitt, in aller Deutlichkeit klarstellten, „dass wir unser theoretisches Verständnis der Typ-II-Supraleiter hauptsächlich Landau, Ginzburg, Abrikosov und Gor'kov verdanken, und dass die ersten maßgeblichen Experimente schon im Jahr 1937 durchgeführt wurden, von Schubnikow“ [11]. Der Nobelpreisträger Pierre-Gilles de Gennes führte die Bezeichnung „Schubnikow-Phase“ für die Region zwischen H_{c1} und H_{c2} ein, um die Bedeutung dieses ebenso faszinierenden wie nützlichen supraleitenden Zustands zu betonen [12].

Jutta Pistor übersetzte diesen Artikel aus dem englischen Original. Eine detailliertere historische Übersicht der Ereignisse findet sich in Ref. [13], [14] und [10].

Literatur

- [1] K. Mendelssohn und J. R. Moore, Nature **135**, 826 (1935); K. Mendelssohn, Proc. Roy. Soc. **152A**, 34 (1935)
- [2] C. J. Gorter, Physica **2**, 449 (1935)
- [3] H. London, Proc. Roy. Soc. **152A**, 650 (1935)
- [4] L. W. Schubnikow, W. I. Chotkewitsch, J. D. Schepelew und J. N. Rjabinin, Sondernummer Phys. Z. Sowiet.: Arbeiten auf dem Gebiete tiefer Temperaturen, Juni 1936, S. 39; Phys. Z. Sowiet **10**, 165 (1936), L. V. Shubnikov, V. I. Khotkevich, Yu. D. Shepelev und Yu. N. Riabinin, Zh. Exper. Teor. Fiz. (USSR) **7**, 221 (1937); Ukrainian J. Phys. **53**, Special Issue, 42 (2008) [auf Englisch]
- [5] V. I. Ginzburg und L. D. Landau; Zh. Exper. Teor. Fiz. (USSR) **20**, 1064 (1950)
- [6] W. J. De Haas und J. Voogd, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden **N208b**, 9 (1930)
- [7] M. und B. Ruhemann, Low Temperature Physics, Cambridge University Press, Cambridge (1937) S. 274–275, 287–288, 313; D. Shoenberg, Superconductivity, Cambridge University Press, Cambridge (1938) S. 79–86; L. C. Jackson, Superconductivity. Repts. Progr. Phys. **6**, 338 (1940) E. F. Burton, H. G. Smith und J. O. Wilhelm, Phenomena at the Temperature of Liquid Helium, Reinhold Publ. Corp., New York (1940), S. 307–310, 319; K. Mendelssohn, Superconductivity. Repts. Progr. Phys. **10**, 362 (1946); D. Shoenberg, Superconductivity (2. Aufl.). Cambridge University Press, Cambridge, (1952), S. 39–47
- [8] A. A. Abrikosov, Sov. Phys. JETP. **5**, 1174 (1957)
- [9] J. E. Kunzler et al., Phys. Rev. Lett. **6**, 89 (1961)
- [10] T. G. Berlincourt, IEEE Trans. Magnetics. **MAG-26**, 403 (1987)
- [11] J. Bardeen und R. W. Schmitt, International Conference on the Science of Superconductivity, Rev. Mod. Phys. **36**, 1 (1964)
- [12] P. G. De Gennes, Superconductivity of Metals and Alloys, W. A. Benjamin, New York, Amsterdam (1966)
- [13] A. G. Shepelev, The Discovery of Type II Superconductors (Shubnikov Phase), in: A. M. Luiz (Hrsg.), SCYO, Rijeka, S. 17–46 (2010); www.intechopen.com/books/show/title/superconductor
- [14] A. A. Abrikosov, in: T. Frängsnyr (Hrsg.), Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2003, Nobel Foundation, Stockholm (2004)

DIE AUTOREN

Anatoly Shepelev ist der Sohn von G. D. Shepelev. Der leitende Wissenschaftler am Kharkov Institute of Physics and Technology der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften beschäftigt sich mit Typ-I-Supraleitern und den elektronischen Eigenschaften sehr reiner Metalle.



David Larbalestier ist Direktor des Applied Superconductivity Center des National High Magnetic Field Laboratory an der Florida State University. Er ist außerdem Emeritus der Universität von Wisconsin-Madison, an der er bis 2006 forschte und lehrte. Er ist Mitglied der National Academy of Engineering. Larbalestier ist bekannt für seine Arbeiten zu Supraleitern für Hochfeld-Magnete und Anwendungen in der Energietechnik.

